

# Lecciones Aprendidas



## De los participantes de Natural Gas STAR

### INSTALACIÓN DE SISTEMAS DE BOMBEO NEUMÁTICO EN POZOS DE GAS NATURAL (Installing Plunger Lift Systems in Gas Wells)

#### Resumen gerencial

En los pozos de gas maduros, la acumulación de fluidos en el pozo puede obstruir y en ocasiones detener la producción de gas. El flujo de gas se mantiene eliminando los fluidos que se acumulan con el uso de una bomba de balancín o tratamientos de remedio, como limpiando, enjabonando o ventilando el pozo a presión atmosférica (conocido como “purgado” del pozo). Las operaciones de eliminación de fluido, en particular las de purgado, pueden causar emisiones importantes de metano a la atmósfera.

Instalar un sistema de bombeo neumático es una alternativa económica para eliminar los líquidos. Los sistemas de bombeo neumático tienen la ventaja adicional de aumentar la producción, así como reducir significativamente las emisiones de metano que se relacionan con las operaciones de purgado. El bombeo neumático usa la concentración de presión de gas del pozo para bombear hacia fuera del pozo una columna de fluido acumulado. El sistema de bombeado neumático ayuda a mantener la producción de gas y puede reducir la necesidad de tener que realizar otras operaciones de remedio.

Los participantes de Natural Gas STAR informan tener beneficios económicos importantes y reducción de emisiones de metano al instalar los sistemas de bombeo neumático en los pozos de gas natural. Las compañías han reportado ahorros anuales de gas de un promedio de 600 mil pies cúbicos (Mcf) por pozo al evitar el purgado. Además, el aumento de la producción de gas después de la instalación del bombeo neumático ha rendido beneficios totales de gas de hasta 18,250 Mcf por pozo, con un valor calculado de \$54,750. Los beneficios de tanto el aumento de producción de gas y el ahorro de emisiones son específicos al pozo y el depósito y variarán considerablemente.

Medida	Ahorros potenciales de gas del aumento de la producción de gas y las emisiones que se evitan (Mcf/año)	Valor del ahorro de gas <sup>1</sup> (\$)	Costos de montaje típico e instalación (\$/pozo)	Plazo típico de recuperación de la inversión
Instalación de un sistema de bombeo neumático	4,700 - 18,250 <sup>2</sup> por pozo	\$14,100–\$54,750	\$2,000–\$8,000 por pozo	< 1 año

<sup>1</sup> Valor del gas = \$3.00/Mcf.

<sup>2</sup> De acuerdo con los resultados reportados por los participantes de Natural Gas STAR.

## Antecedentes tecnológicos

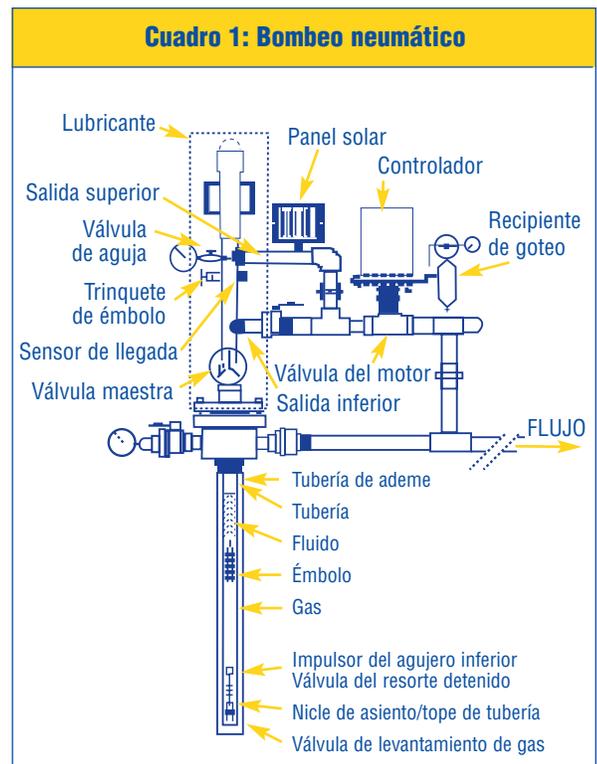
La carga líquida del agujero del pozo con frecuencia es un problema serio en los pozos de producción envejecientes. Los operadores comúnmente usan bombas de balancín o técnicas de remedio, como la ventilación o el “purgado” del pozo a la presión atmosférica, o la eliminación de la acumulación de líquido y la restauración de la productividad del pozo. Sin embargo, estas técnicas causan pérdidas de gas. En el caso del purgado de un pozo, el proceso debe repetirse con el tiempo ya que los líquidos vuelven a acumularse, lo cual causa emisiones adicionales de metano.

Los sistemas de bombeo neumático son una alternativa económica a tanto las bombas de balancín como al purgado del pozo y pueden reducir significativamente las pérdidas de gas, eliminar o reducir la frecuencia de tratamientos futuros del pozo y mejorar la productividad del pozo. El sistema de bombeo neumático es una forma de bombeo intermitente de gas que usa la acumulación de la presión de gas en la corona de la tubería de ademe para empujar el émbolo de acero, y la columna de líquido que está más adelante, hacia arriba de la tubería del pozo hasta la superficie. El émbolo sirve como pistón entre el líquido y el gas, lo cual minimiza el retroceso del líquido, y como raspador de escamas y parafina. El Cuadro 1 representa un sistema de bombeo neumático típico.

El funcionamiento de un sistema de bombeo neumático se apoya en la acumulación natural de presión en el gas del pozo durante el tiempo en que el pozo esté cerrado temporalmente (sin producir). La presión del pozo cerrado temporalmente debe ser lo suficientemente más alta que la presión de la línea de venta como para levantar el émbolo y la carga de líquido a la superficie. Un mecanismo de válvula, controlado por un microprocesador, regula la entrada de gas a la tubería de ademe y automatiza el proceso. El controlador normalmente se energiza mediante una batería recargable solar y puede ser un sencillo ciclo de cronómetro o tener una memoria de estado sólido y funciones programables con base en sensores de proceso.

La operación de un sistema de bombeo neumático típico implica los pasos siguientes:

1. El émbolo descansa en el resorte impulsor del agujero inferior que se ubica en la base del pozo. Conforme se produce gas en la línea de ventas, los líquidos se acumulan en el agujero del pozo, creando un aumento gradual en contrapresión que hace más lenta la producción de gas.



---

## Beneficios económicos y para el medio ambiente

2. Para invertir el descenso de la producción de gas, el pozo se cierra temporalmente en la superficie mediante un controlador automático. Esto causa que la presión del pozo aumente conforme un volumen grande de gas a alta presión se acumula en la corona entre la tubería de ademe y la tubería. Una vez que se obtiene suficiente volumen de gas y presión, el émbolo y la carga de líquido son empujados a la superficie.
3. Conforme se levanta el émbolo a la superficie, el gas y los líquidos acumulados por encima del émbolo fluyen a través de las salidas superior e interior.
4. El émbolo llega y queda capturado en el lubricante, situado enfrente de la salida superior del lubricador.
5. El gas que ha levantado el émbolo fluye a través de la salida inferior a la línea de ventas.
6. Una vez que se estabiliza el flujo de gas, el controlador automático libera el émbolo, bajándolo por la tubería.
7. El ciclo se repite.

Sistemas nuevos de tecnología de información han hecho más eficiente la vigilancia y el control del bombeo neumático. Por ejemplo, las tecnologías como el control de datos en línea y las comunicaciones satelitales permiten a los operadores controlar los sistemas de bombeo neumático a control remoto, sin visitas regulares al campo. Los operadores visitan solamente los pozos que necesitan atención, lo cual aumenta la eficiencia y reduce el costo.

La instalación de un sistema de bombeo neumático sirve como una alternativa económica a las bombas de balancín y el purgado del pozo y rinde beneficios importantes económicos y ambientales. La extensión y el origen de esos beneficios dependen del sistema de eliminación de líquidos que esté reemplazando el bombeo neumático.

- ★ **Comparación entre costos más bajos de capital y la instalación del equipo de bombas de balancín.** El costo de instalar y mantener un bombeo neumático generalmente son menores que el costo de instalar y mantener el equipo de bombas de balancín.
- ★ **Menos mantenimiento al pozo y menos tratamientos de remedio.** Los costos generales de mantenimiento del pozo se reducen debido a que los tratamientos periódicos de remedio como el limpiado o el purgado del pozo se reducen o no se necesitan más con los sistemas de bombeo neumático.
- ★ **La producción continua mejora las tasas de producción de gas y aumenta la eficiencia.** Los sistemas de bombeo neumático pueden conservar la energía de levantamiento del pozo y aumentar la producción de gas. La eliminación regular de líquido permite que el pozo produzca gas continuamente y evita la carga de líquido que detiene periódicamente la producción de gas o “mata” el pozo. Con frecuencia, la eliminación continua de los líquidos causados por las tasas de producción diaria de gas es mayor que las tasas de producción antes de la instalación del bombeo neumático.

## Proceso de decisión

- ★ **Reducción de acumulación de parafina y escamas.** En los pozos donde la acumulación de parafina o escamas es un problema, la acción mecánica del émbolo subiendo y bajando en la tubería puede evitar la acumulación particular dentro de la tubería. Por lo tanto, la necesidad de tratamientos químicos o de limpieza puede reducirse o eliminarse. Muchos tipos distintos de émbolos se fabrican con “lavadoras oscilantes” para mejorar el desempeño del “tallado”.
- ★ **Emisiones más bajas de metano.** Eliminando los tratamientos repetitivos de remedio y los servicios a pozo también se reducen las emisiones de metano. Los participantes de Natural Gas STAR han reportado ahorros anuales de gas en un promedio de 600 Mcf por pozo al evitar el purgado y un promedio de 30 Mcf al año eliminando los servicios a pozo.
- ★ **Otros beneficios económicos.** Al calcular los beneficios económicos del bombeo neumático, los ahorros de las emisiones que se evitan son solamente uno de los muchos factores que deben considerarse en el análisis. Puede haber ahorros adicionales del valor de lo que se rescata del equipo excedente de producción y la reducción relacionada con los costos de electricidad y servicios a pozo. Además, los pozos que mueven agua continuamente fuera del agujero del pozo tienen el potencial de producir más líquido condensado y petróleo.

Los operadores deben evaluar el bombeo neumático como una alternativa al purgado del pozo y al equipo de bomba de balancín. La decisión de instalar un sistema de bombeo neumático debe tomarse de acuerdo a cada caso. Los participantes pueden usar el siguiente proceso de decisiones como guía para evaluar la aplicabilidad y la economía de los sistemas de bombeo neumático para sus pozos de producción de gas.

**Paso 1: Determinación de la viabilidad técnica de una instalación de bombeo neumático.** El bombeo neumático es aplicable a los pozos de gas que experimentan cargado de líquido y tienen suficiente volumen de gas y presión de cierre excesiva para levantar los líquidos del depósito a la superficie. El Cuadro 2 indica cuatro características comunes de pozos que son buenos indicadores de la aplicabilidad del bombeo neumático. Los vendedores con frecuencia suministran materiales impresos designados a ayudar a los operadores a establecer si un pozo en particular se beneficiaría con la instalación de un sistema de bombeo neumático. Como ejemplo, un pozo que tiene 3,000 pies de profundidad, produce hacia una línea de ventas de 100 psig, tiene una presión de cierre de 150 psig y debe ventilarse a la atmósfera diariamente

### Cuatro pasos para la evaluación de los sistemas de bombeo neumático:

1. Determinación de la viabilidad técnica de una instalación de bombeo neumático;
2. Determinación del costo de un sistema de bombeo neumático;
3. Cálculo de los ahorros del bombeo neumático; y
4. Evaluación de la economía del bombeo neumático.

para expulsar y tiene un promedio de tres barriles de acumulación de agua al día. Este pozo tiene suficiente excedente de presión de cierre y debería producir 3,600 scf al día (400 scf/bbl/1000 pies de profundidad por 3000 pies de profundidad, por 3 barriles de agua al día) para justificar el uso del bombeo neumático.

### **Cuadro 2: Requisitos comunes de las aplicaciones del bombeo neumático**

- ★ El purgado de pozos y otras técnicas de eliminación de líquidos son necesarios para mantener la producción.
- ★ Los pozos deben producir por lo menos 400 scf de gas por barril de líquido por 1,000 pies de profundidad.
- ★ Los pozos con presión de cierre de la cabeza del pozo que es mayor de 1.5 veces la presión de la línea de ventas.
- ★ Los pozos con acumulación de escamas y parafina.

**Paso 2: Determinación del costo de un sistema de bombeo neumático.** Los costos relacionados con el bombeo neumático incluyen el capital, los gastos de establecimiento y mano de obra para comprar e instalar el equipo, así como el costo continuo para operar y mantener el sistema. Estos costos incluyen:

- ★ **Costos de capital, instalación y puesta en marcha.** El costo de la instalación básica del bombeo neumático es aproximadamente de \$1,500 a \$6,000. En contraste, la instalación del equipo de bombeo de superficie, tal como las bombas de balancín, cuesta entre \$20,000 y \$40,000. El costo de la instalación del bombeo neumático incluye la instalación de la tubería, las válvulas, el controlador y el suministro de energía en la cabeza del pozo y establecer el ensamble del impulsor del émbolo del agujero suponiendo que la tubería del pozo esté abierta y libre. La variable más grande en el costo de instalación es colocar una línea de cable para evaluar la tubería (verificar si existen obstrucciones internas) y probar un émbolo de arriba abajo (apertura) para garantizar que el émbolo se mueva libremente para arriba y para abajo en la tubería. Otros costos de la puesta en marcha pueden incluir la medición de la profundidad del pozo, la limpieza para eliminar los líquidos del agujero del pozo, la acidización para eliminar las escamas minerales y limpiar las perforaciones, extraer los desechos del pozo y otras operaciones misceláneas de limpieza del pozo. Estos costos adicionales iniciales pueden fluctuar de \$500 a más de \$2000.

Los operadores que estén considerando la instalación de bombeo neumático deben saber que el sistema requiere una línea de tubería continua con un diámetro interno constante en buenas condiciones. El reemplazo de la línea de tubería, de ser necesario, puede añadir varios miles de dólares más al costo de instalación, dependiendo de la profundidad del pozo.

- ★ **Costos de operación.** El mantenimiento del bombeo neumático requiere la inspección de rutina del lubricante y el émbolo. Por lo general, estos artículos necesitan reemplazarse cada 6 a 12 meses, a un costo aproximado de \$500 a \$1,000 al año. Los demás componentes del sistema se inspeccionan anualmente.

**Paso 3: Cálculo de los ahorros del bombeo neumático.** Los ahorros relacionados con el bombeo neumático incluyen:

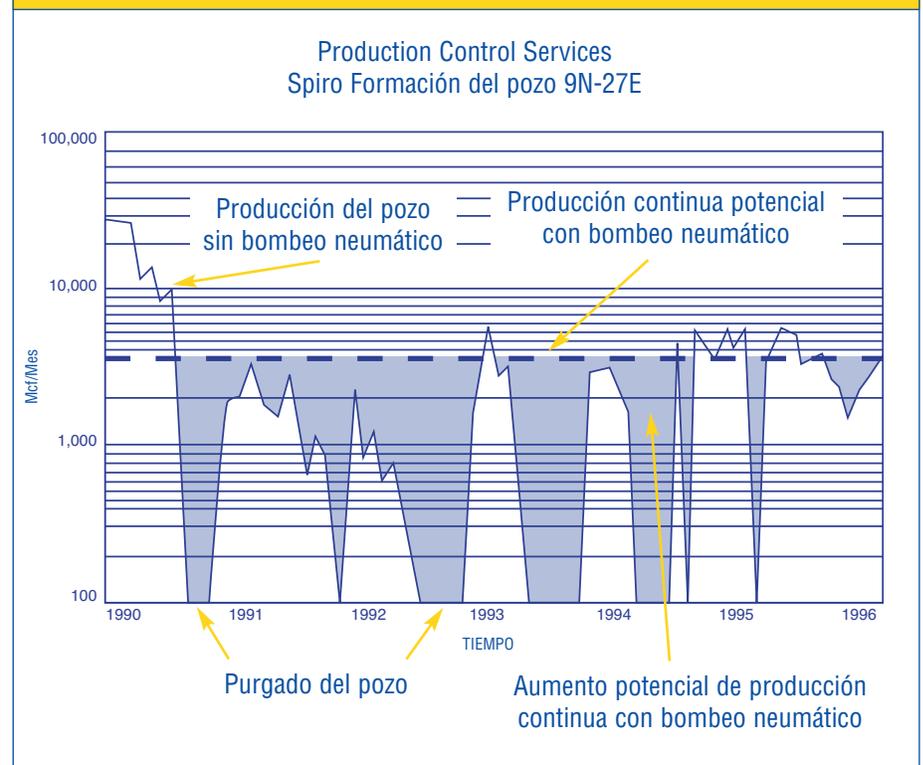
- ★ El ingreso derivado del aumento de la producción;
- ★ El ingreso derivado de las emisiones que se evitan;
- ★ Los costos adicionales que se evitan – costos de tratamiento al pozo, reducción del costo de electricidad, costos de servicios a pozo y
- ★ El valor de lo que puede rescatarse.

### Ingreso derivado del aumento de la producción

El beneficio más importante de las instalaciones de bombeo neumático es el aumento que causa en la producción de gas. Durante el proceso de decisión, el aumento en la producción no puede medirse directamente y tiene que calcularse. La metodología para calcular este aumento esperado de producción varía dependiendo del estado del pozo. La metodología para los pozos continuos o que no están en decadencia es relativamente sencilla. En contraste, la metodología para calcular la producción incremental de los pozos en decadencia es más compleja.

- ★ **Cálculo del incremento en la producción de gas en los pozos que no están en decadencia.** El incremento en la producción de gas por la instalación de bombeo neumático puede calcularse suponiendo que la tasa de producción máxima promedio que se logra después del purgado está cerca a la tasa potencial de producción máxima del pozo con el líquido extraído. Puede usarse un registro del pozo, como el que se ilustra en el Cuadro 3 para calcular el aumento potencial de producción.

**Cuadro 3: Incremento de producción en los pozos que no están en decadencia**



En este cuadro, la línea sólida muestra la tasa de producción del pozo gradualmente, después disminuye abruptamente conforme se acumula el líquido en la tubería. La producción se restaura ventilando el pozo a la atmósfera, pero vuelve a disminuir con la reacumulación de líquidos. Note que la escala de tasa de producción, en miles de pies cúbicos al mes, es una escala de registro. La línea punteada muestra la tasa de producción máxima promedio después de descargar los líquidos. Esto se supone que es igual a la tasa potencial de producción máxima que podría lograrse con el sistema de bombeo neumático, típicamente por lo menos 80 por ciento de la tasa de producción máxima después del purgado. El área oscurecida entre la producción potencial (línea punteada) y la producción real del pozo (línea sólida) representa el cálculo del aumento incremental de la producción de gas que puede lograrse con un sistema de bombeo neumático.

★ **Cálculo del incremento de la producción en los pozos en decadencia o en situaciones en las cuales se desconoce el nivel máximo de producción después del purgado.** Los pozos que están en decadencia o se operan sin purgar periódicamente requieren métodos más detallados de cálculo del aumento de la producción bajo los sistemas de bombeo neumático. Las instalaciones de bombeo neumático en los pozos en decadencia, por ejemplo, requerirán la generación de una curva mejorada de decadencia a causa de la presión reducida en las perforaciones. Los operadores deben buscar la ayuda de un ingeniero de depósitos para auxiliar estas determinaciones (vea el Apéndice).

Una vez que se calcula el aumento de la producción de una instalación de bombeo neumático, los operadores pueden calcular el valor del aumento de gas y calcular los aspectos económicos de la instalación de bombeo neumático. El Cuadro 4 presenta un ejemplo de los rendimientos financieros potenciales en diferentes niveles de aumento de la producción de gas. Es importante reconocer que los costos y las condiciones locales pueden variar. Observe también que el ejemplo del Cuadro 4 no toma en cuenta otros beneficios financieros del proyecto de instalación de bombeo neumático, como las emisiones que se evitan y la reducción del costo de electricidad y tratamientos químicos, los cuales se describen más adelante en esta Lección Aprendida. La consideración a estos beneficios adicionales podría mejorar el excelente rendimiento financiero que ya existe con la instalación de bombeo neumático.

**Cuadro 4: Ejemplo del rendimiento financiero calculado en varios niveles de aumento de gas en la producción de gas de una instalación de bombeo neumático**

Incremento de producción de gas (Mcf/d)	Plazo de recuperación de la inversión (meses)	Tasa interna de rendimiento (%)	Rendimiento de la inversión (%)
3	28	38	350
5	16	69	580
10	8	144	1,150
15	5	219	1,730
20	4	294	2,310
25	3	369	2,880
30	3	444	3,460

Suposiciones:

Valor del gas \$3.00/Mcf.

Costo del sistema de bombeo neumático \$6,000 incluyendo el costo de la puesta en marcha.

Gasto de operación alquilada \$600/mes.

Reducción de producción de 6%/año.

Tasa de descuento de 15%.

Fuente: Production Control Services, Inc.

### Rendimiento de las emisiones que se evitan

La cantidad de emisiones de gas natural reducidas después de la instalación del bombeo neumático variarán grandemente en cada pozo, de acuerdo con el pozo individual y las características del depósito como la presión de la línea de ventas, la presión de cierre del pozo, la tasa de acumulación de líquidos y las dimensiones del pozo (profundidad, diámetro del ademe, diámetro de la tubería). Sin embargo, la variable más importante es la práctica de operación normal de ventilar los pozos. Algunos operadores colocan pozos en cronómetros automáticos de ventilación, mientras que otros ventilan los pozos manualmente con el operador presente para vigilar el ventilado, y otros abren la ventila del pozo y se van, volviendo horas o días después, dependiendo de cuánto tiempo tarda por lo general para que el pozo elimine los líquidos. Por lo tanto, los beneficios económicos de las emisiones que se evitan también variarán considerablemente. Esta amplia variabilidad significa que algunos proyectos tendrán períodos de recuperación de la inversión mucho más cortos que otros. Aunque la mayoría de las instalaciones de bombeo neumático se justificará solamente con el aumento en la tasa de producción de gas, la reducción de las emisiones de gas metano puede ofrecer una corriente de reserva adicional.

- ★ **Emisiones evitadas cuando se reemplaza el purgado.** En los pozos donde se instalan sistemas de bombeo neumático, pueden reducirse las emisiones del purgado del pozo. Las emisiones de purgado varían ampliamente en frecuencia y en tasa de flujo y son completamente específicas al pozo y al depósito. Las emisiones que se atribuyen a las actividades de purgado se han reportado de 1 Mcf al año hasta miles de Mcf al año por cada pozo. Por lo tanto, los ahorros que se atribuyen a las emisiones que se evitan variarán grandemente de acuerdo con los datos del pozo que recibe reparación general en particular.

El rendimiento de las emisiones que se evitan puede calcularse multiplicando el valor del mercado del gas por el volumen de las emisiones que se evitan. Si las emisiones del pozo por purgado no se han medido, entonces deben calcularse. En el ejemplo a continuación, la cantidad de gas que se ventila de un pozo de gas a baja presión en cada purgado se calcula que es 0.5625 veces la tasa sostenida de flujo de gas. Este factor de emisión supone que el flujo promedio integrado en el período de purgado es 56.25 por ciento de flujo completo del pozo. Usando esta suposición, el Cuadro 6 demuestra que para un pozo descargado que produce 100 Mcf al día, el gas ventilado a la atmósfera puede calcularse en 2 Mcf por hora de purgado.

<b>Cuadro 5: Ejemplo: Cálculo de las emisiones que se evitan con el purgado</b>	
Las emisiones que se evitaron por hora de purgado	= (0.5625 <sup>1</sup> x tasa de flujo sostenido diario) ÷ 24 horas/día
Emisiones que se evitan <sup>2</sup>	= (0.5625 x 100 Mcfd) ÷ 24 = 2 Mcf por hora de purgado
Valor anual de las emisiones que se evitan <sup>3</sup>	= 2 Mcf x 12 x \$3.00/Mcf = \$72 al año
<p><sup>1</sup> El factor recomendado de emisiones de metano reportado en el estudio conjunto de GRI/EPA, Methane Emissions From the Natural Gas Industry, Volume 7: Blow and Purge Activities (junio de 1995). El estudio calculó que al principio de un evento de purgado, el flujo de gas se restringe por los líquidos del pozo hasta un 25 por ciento del flujo completo. Para el final del evento de purgado, el flujo de gas vuelve al 100 por ciento. El flujo integrado promedio durante el período de purgado es 56.25 por ciento del flujo completo del pozo.</p> <p><sup>2</sup> Suponiendo que hay una tasa de producción diaria de 100 Mcfd.</p> <p><sup>3</sup> Suponiendo 1 purgado al mes que dure 1 hora.</p>	

Este método es fácil de usar, pero las pruebas anecdóticas sugieren que produce cálculos demasiado bajos de emisiones de metano que se evitan. Como método alternativo para calcular las emisiones que se evitan mediante el purgado, vea el Apéndice.

Dado el alto grado de variabilidad en las emisiones de acuerdo con las características específicas del pozo y el depósito, la medición es el método preferido para determinar las emisiones que se evitan. La medición de campo puede proporcionar los datos necesarios para determinar con precisión los ahorros atribuibles a las emisiones que se evitaron.

★ **Emisiones evitadas cuando se reemplazan bombas de balancín.** En casos donde el bombeo neumático reemplaza bombas de balancín en lugar de purgados, las emisiones se evitarán debido a la reducción de servicios a pozo de reparaciones mecánicas, perforaciones para eliminar desechos y limpiezas, para eliminar las escamas minerales y los depósitos de parafina del vástago del émbolo. Las emisiones promedio que se relacionan con los servicios a pozo han sido reportadas como aproximadamente 2 Mcf por reoperación, la

frecuencia de los servicios a pozo se ha reportado con una fluctuación de 1 a 15 al año. Debido a las características específicas del pozo como el flujo durante la reoperación, la duración y la frecuencia de la reoperación, las emisiones que se evitan pueden variar mucho.

### Costos que se evitan y beneficios adicionales

Los costos que se evitan dependen del tipo de sistemas de eliminación de agua que se encuentren en vigor en la actualidad, pero puede incluir el evitar el tratamiento del pozo, la reducción del costo de electricidad y el costo de tener menos servicios a pozo. Los costos de los tratamientos evitados del pozo se aplican cuando el bombeo neumático reemplaza el bombeo de balancín u otras técnicas de remedio como el purgado, la limpieza o el enjabonado. Los costos reducidos de electricidad, la reducción de servicios a pozo y el valor de lo que puede rescatarse solamente son aplicables si el bombeo neumático reemplaza el bombeo de balancín.

- ★ **Costo de tratamientos que se evitan en el pozo.** El costo de tratamientos del pozo incluyen los tratamientos químicos, las limpiezas microbianas y la eliminación de varillas y tallado del agujero del pozo. La información de pozos poco profundos de 1,500 pies muestra el costo de remedio de pozos incluyendo la remoción de varillas y la rehabilitación de la tubería como más de \$11,000 por pozo. El costo de los tratamientos químicos (inhibidores, solventes, dispersantes, líquidos calientes, modificadores de cristales y agentes tensioactivos) se reportan en los materiales impresos a un mínimo de \$10,000 por pozo al año. Se ha demostrado que el costo del tratamiento microbiano para reducir la parafina es de \$5,000 por pozo al año (note que los tratamientos microbianos no solucionan el problema de la entrada de líquido). Cada costo de estos tratamientos aumenta la gravedad de las escamas o los aumentos de parafina, y conforme aumenta la profundidad del pozo.
- ★ **Costo reducido de electricidad en comparación con el bombeo de balancín.** Los costos operativos reducidos de electricidad aumentan más el rendimiento económico del bombeo neumático. No se asocian costos eléctricos con el bombeo neumático, debido a que la mayoría de los controladores son de energía solar con batería de respaldo. El Cuadro 6 presenta una gama de costos evitados de electricidad reportados por operadores que han instalado bombeo neumático. Suponiendo que haya 365 días de operación, la gama de costos de electricidad que se evitó fue de \$1,000 a \$7,300 al año.

<b>Cuadro 6: Costo de electricidad<sup>1</sup> que se evitó usando el bombeo neumático en lugar del bombeo de balancín</b>	
<b>Tamaño del motor (BHP)</b>	<b>Costo de operación (\$/día)</b>
10	3
20	7
30	10
40	13
50	17
60	20

<sup>1</sup> El costo de electricidad supone el 50 por ciento de carga completa, funcionando el 50 por ciento del tiempo, con un costo de 7.5 centavos/kWh.

- ★ **Costo reducido del servicio a pozo en comparación con el bombeo de balancín.** El costo de servicios a pozo relacionadas con el bombeo de balancín se ha reportado como \$1,000 al día. Aunque los servicios a pozo típicas pueden tardar un día, los pozos con más de 8,000 pies de profundidad requerirán más de un día de servicios a pozo. Dependiendo del pozo, pueden requerirse de 1 a 15 servicios a pozo al año. Estos costos se evitan usando el bombeo neumático.
- ★ **El valor de producto rescatado cuando se reemplaza el bombeo de balancín.** Si el émbolo instalado reemplaza el bombeo de balancín, se logra ingreso adicional y un mejor rendimiento económico del valor del producto rescatado del equipo de la vieja producción. El Cuadro 7 muestra el valor del producto rescatado que puede obtenerse vendiendo las unidades de bombeo excedentes. En algunos casos, las ventas del producto rescatado pueden pagar la instalación del bombeo neumático.

<b>Cuadro 7: Valor del producto rescatado<sup>1</sup> del equipo legado cuando se convierte de operaciones con bombeo de balancín a bombeo neumático</b>	
<b>Ahorros de capital del equipo rescatado</b>	
<b>Tamaño de la unidad de bombeo (torsión pulg.-lbs)</b>	<b>Valor del equipo rescatado (\$)</b>
114,000	9,500
160,000	13,000
228,000	16,500
320,000	21,000
456,000	26,500
640,000	32,000

<sup>1</sup> Costo de rescates incluyendo el cálculo bajo del valor de venta de la unidad de bombeo, el motor eléctrico y línea de varilla.

**Paso 4: Evaluación de la economía del bombeo neumático.** Puede usarse un análisis básico de flujo de efectivo para comparar el costo y los beneficios del bombeo neumático con otras opciones de eliminación de líquidos. El Cuadro 8 muestra un resumen del costo relacionado con cada opción.

<b>Cuadro 8: Comparación del costo del bombeo neumático con otras opciones</b>			
<b>Categoría de costo</b>	<b>Bombeo neumático</b>	<b>Bombeo de balancín tradicional</b>	<b>Tratamiento de remedio<sup>1</sup></b>
Costos de capital e iniciales	\$1,500–\$6,000	\$20,000 - \$40,000	\$0
Costos de implementación:			
Mantenimiento <sup>2</sup>	\$1,000/año	\$1,000–\$15,000/año	\$0
Tratamiento del pozo <sup>3</sup>	\$0	\$10,000+	\$10,000+
Electricidad <sup>4</sup>	\$0	\$1,000–\$7,300/año	\$0
Rescatado	\$0	(\$9,000–\$32,000)	\$0
<sup>1</sup> Incluye enjabonado, limpiado y purgado. <sup>2</sup> Para el mantenimiento tradicional del bombeo de balancín el costo incluye los servicios a pozo y supone 1 a 15 servicios a pozo al año a \$1,000 cada reoperación. <sup>3</sup> El costo puede variar dependiendo del tipo de líquido. <sup>4</sup> El costo de electricidad por el bombeo neumático supone que el émbolo es solar y el pozo tiene energía.			

- ★ **Aspectos económicos de reemplazar el bombeo de balancín con bombeo neumático.** En el Cuadro 9 los datos del Cuadro 8 se usan como modelo en un pozo hipotético de 100 Mcfd y para evaluar los aspectos económicos de la instalación del bombeo neumático. El aumento en producción es de 20 Mcf al día, lo que rinde un aumento anual de la producción de 7,300 Mcf. Suponiendo que se realiza una reoperación al año antes de la instalación, el cambio al bombeo neumático también provee 2 Mcf de emisiones que se evitan al año. El proyecto se beneficia grandemente del valor de lo rescatado del equipo de bombeo de balancín excedente, lo que rinde una recuperación inmediata de la inversión. Incluso si el valor de lo rescatado no se recupera, el proyecto puede rendir la recuperación de la inversión en unos cuantos meses dependiendo de la productividad del pozo.

<b>Cuadro 9: Análisis económico del reemplazo con bombeo neumático de un bombeo de balancín</b>						
	<b>Año 0</b>	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>Año 3</b>	<b>Año 4</b>	<b>Año 5</b>
El valor del gas de la producción aumentada y las emisiones evitadas <sup>1</sup>		\$21,906	\$21,906	\$21,906	\$21,906	\$21,906
Equipo de bombeo neumático y costo de la puesta en marcha	(\$6,000)					
Mantenimiento del bombeo neumático		(\$1,000)	(\$1,000)	(\$1,000)	(\$1,000)	(\$1,000)
Costo de electricidad al año	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
Valor de rescate del equipo de bombeo de balancín	\$16,500					
Mantenimiento que se evita del mantenimiento del bombeo de balancín (1 reoperación/año)		\$1,000	\$1,000	\$1,000	\$1,000	\$1,000
Costos de electricidad del bombeo de balancín que se evitan (motor de 10 HP)		\$1,000	\$1,000	\$1,000	\$1,000	\$1,000
Tratamientos químicos que se evitan		\$10,000	\$10,000	\$10,000	\$10,000	\$10,000
Entrada neta de efectivo	\$10,500	\$32,906	\$32,906	\$32,906	\$32,906	\$32,906
<b>NPV (Valor neto presente)<sup>2</sup> = \$122,945</b>						
<b>Plazo de recuperación de inversión = inmediato</b>						
<sup>1</sup> Valor del gas a \$3.00 por Mcf para 7,300 Mcf debido al aumento de producción y 2 Mcf de las emisiones que se evitaron por evento (de acuerdo con una reoperación al año). <sup>2</sup> Valor neto presente de acuerdo con la tasa de descuento de 10 por ciento durante 5 años.						

★ **Aspectos económicos de evitar el purgado con bombeo neumático**

El Cuadro 10 usa datos del Cuadro 8 para evaluar los aspectos económicos de un pozo hipotético de 100 Mcfd en el cual se instala bombeo neumático para reemplazar el purgado como método para eliminar el líquido del pozo. Suponiendo que la producción aumentada sea 20 Mcf al día, el aumento anual de la producción será 7,300 Mcf. Además, habrá ahorros de las emisiones que se evitan durante el purgado. Suponiendo 12 purgados al año de una hora, las emisiones que se evitan son 24 Mcf al año.

**Cuadro 10: Análisis económico de reemplazar con bombeo neumático el purgado**

	<b>Año 0</b>	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>Año 3</b>	<b>Año 4</b>	<b>Año 5</b>
El valor del gas de la producción aumentada y las emisiones evitadas <sup>1</sup>		\$21,972	\$21,972	\$21,972	\$21,972	\$21,972
Equipo de bombeo neumático y costo de la puesta en marcha	(\$6,000)					
Mantenimiento del bombeo neumático		(\$1,000)	(\$1,000)	(\$1,000)	(\$1,000)	(\$1,000)
Costo de electricidad al año	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
Tratamientos químicos que se evitan		\$10,000	\$10,000	\$10,000	\$10,000	\$10,000
Entrada neta de efectivo	(\$6,000)	\$30,972	\$30,972	\$30,972	\$30,972	\$30,972
<b>NPV (Valor neto presente)<sup>2</sup> = \$101,280</b>						
<b>Plazo de recuperación de la inversión = &lt; 6 meses</b>						
<sup>1</sup> Valor del gas a \$3.00 por Mcf para 7,300 Mcf debido al aumento de producción y 24 Mcf de las emisiones que se evitaron por evento (de acuerdo con 12 servicios a pozo al año y 2 Mcf por purgado). <sup>2</sup> Valor neto presente de acuerdo con la tasa de descuento de 10 por ciento durante 5 años.						

## Estudio de casos

### Amoco Midland Farm Field

Amoco Corporation, un participante contratado de Natural Gas STAR (ahora parte de BP), documentó su éxito al reemplazar el bombeo de balancín, el equipo de producción del pozo con bomba de varilla con bombas neumáticas en su campo Midland Farm. Antes de instalar los sistemas de bombeo neumáticos, Amoco usaba instalaciones de bombeo de balancín con cuerdas de varillas de fibra de vidrio. El equipo elevador eran principalmente unidades de bombeo de 640 pulg.-lb. mediante motores de 60 HP. El personal de operaciones notó que los pozos del campo tenían problemas con parafina que recubría el agujero del pozo y los vástagos de los émbolos, lo cual bloqueaba el flujo e interfería con el movimiento del vástago de fibra de vidrio. El bombeo neumático se vio como una posible solución para inhibir la acumulación de parafina en el agujero del pozo.

Amoco comenzó el programa de reemplazo de bombeo neumático con un proyecto de un solo pozo piloto. De acuerdo con el éxito de este esfuerzo inicial, Amoco expandió el proceso de reemplazo al campo entero. Como resultado del éxito del campo Midland Farm, Amoco instaló 190 unidades de bombeo neumático en Denver City y Sundown, ubicaciones en Texas, reemplazando otras aplicaciones de bombeo de balancín.

## Costo y beneficios

Amoco calculó que el costo de la instalación de sistemas de bombeo neumático incluyendo el equipo neumático y los costos de conversión de la tubería serían un promedio de \$10,000 por pozo (los costos pilotos iniciales fueron más altos que el promedio durante la fase de aprendizaje, y el costo de la conversión de la tubería se incluyó).

Después Amoco calculó los ahorros que se obtenían de los costos que se evitaban en tres áreas: electricidad, servicios a pozo y tratamientos químicos. En general, Amoco calculó que los costos que se evitaban en electricidad, servicios a pozo y control de parafina promediaban \$20,000 por pozo al año.

- ★ **Electricidad.** Los ahorros de costo se calcularon de acuerdo con 50 por ciento de veces de operación. Usando el costo del Cuadro 6, los ahorros de costo eléctrico calculados fueron aproximadamente de \$20 al día.
- ★ **Servicios a pozo.** En promedio, Amoco tuvo una reoperación al año por pozo para reparar piezas del émbolo. Con los viejos sistemas de bombeo de balancín, el costo de esta operación era de \$3,000 dando un promedio de \$8 al día.
- ★ **Tratamiento químico.** Los ahorros mayores se lograron de los tratamientos químicos que se evitaron. Amoco pudo ahorrar aproximadamente \$10,000 por pozo al año en control de parafina ya que la operación neumática eliminó la acumulación de parafina en la tubería.

## Aumento de la producción de gas e ingreso

Para la instalación inicial del bombeo neumático, Amoco logró un aumento en la producción de gas de más de 400 Mcf al día. Una vez que se extendió la instalación del bombeo neumático al campo entero, la compañía logró un éxito notable en muchos pozos, aunque algunos mostraron poco o nada de aumento de producción durante el período de evaluación de 30 días. El aumento total de la producción (incluyendo tanto la producción aumentada y el ahorro del gas no emitido) en todos los pozos en donde se instaló el bombeo neumático fue de 1,348 Mcf al día. Los ahorros de gas anuales promedio, los cuales suponen una reducción del 6 por ciento en la producción, fue de 11,274 Mcf por pozo o aproximadamente \$33,822 por pozo. El Cuadro 11 y el Cuadro 12 resumen los resultados iniciales y los aspectos económicos del primer año de la instalación de bombeo neumático en el campo Midland Farm de Amoco. Además de los ahorros de gas y de costo de las instalaciones de bombeo neumático, Amoco logró una ganancia individual de la venta de las unidades de bombeo y los motores excedentes, lo cual causó un ingreso adicional de \$32,000 por instalación.

## Análisis

A continuación se proporciona un resumen del costo y los beneficios relacionados con el programa de instalación de bombeo neumático de Amoco en el Cuadro 12. En el primer año de operación, la compañía logró un promedio de ahorros anuales de aproximadamente \$44,700 por pozo. Además la compañía logró aproximadamente \$32,000 por pozo por el equipo de bombeo de balancín excedente.

**Cuadro 11: Cambio de las tasas de producción debido a la instalación del bombeo neumático en el campo Midland Farm de Texas**

<sup>1</sup> Pozo #	Producción antes del bombeo neumático			Producción 30 días después de la instalación		
	Gas (Mcf)	Petróleo (Bpd)	Agua (Bpd)	Gas (Mcf)	Petróleo (Bpd)	Agua (Bpd)
1	233	6	1	676	5	1
2	280	15	1	345	15	1
3	240	13	2	531	33	11
4	180	12	2	180	16	3
5	250	5	2	500	5	2
6	95	8	2	75	12	0
7	125	13	1	125	14	0
8	55	6	1	55	13	2
9	120	45	6	175	40	0
10	160	16	3	334	17	3
11	180	7	12	80	6	6
12	215	15	4	388	21	2
13	122	8	8	124	12	7
14	88	5	10	23	9	1
Promedio	167	12	4	258	16	3

<sup>1</sup> Todos los pozos aproximadamente de 11,400 pies de profundidad.  
Fuente: World Oil, noviembre de 1995

**Cuadro 12: Aspectos económicos de Amoco del reemplazo de bombeo de balancín con bombeo neumático**

Ahorros anuales promedio de gas <sup>1</sup> (Mcf/año)	Valor del ahorro de gas al año <sup>2</sup>	Costo de la instalación del bombeo neumático por pozo	Costo de las reoperaciones de la varilla que se evitaron por pozo al año	Tratamientos químicos que se evitaron por pozo al año	Costos eléctricos que se evitaron por pozo al día	Ahorros promedio por pozo <sup>3</sup>	Valor adicional del equipo rescatado del bombeo de balancín por pozo
11,274	\$33,822	\$10,000	\$3,000	\$10,000	\$20	\$44,700	\$32,000

<sup>1</sup> Producción inicial promedio de gas = 1,348 Mcfd. Supone una disminución en la producción del 6 por ciento anual.  
<sup>2</sup> Valor del gas a \$3.00 por Mcf.  
<sup>3</sup> El valor que se ahorró se promedia entre 14 pozos.

### Campo Big Piney de Mobil

En el campo Big Piney en Wyoming, el participante contratado de Natural Gas STAR Mobil Oil Corporation (ahora parte de Exxon) ha instalado sistemas de bombeo neumático en 19 pozos. Los primeros dos bombes neumáticos se instalaron en 1995, y los pozos restantes se equiparon en 1997. Gracias a estas instalaciones,

Mobil redujo las emisiones de gas generales por purgados en 12,166 Mcf al año. Además de la reducción de emisiones de metano, el sistema de bombeo neumático redujo la ventilación de etano (6 por ciento por volumen), hidrocarburos C3 + VOC [componentes orgánicos volátiles] (5 por ciento) e inertes (2 por ciento). El Cuadro 13 muestra reducciones de emisiones en cada pozo después de la instalación del bombeo neumático.

<b>Cuadro 13: Programa de bombeo neumático en el campo Big Piney, Wyoming</b>			
<b>Pozo #</b>	<b>Volumen de emisiones antes del bombeo neumático (Mcf/año/pozo)</b>	<b>Volumen de emisiones después del bombeo neumático (Mcf/año/pozo)</b>	<b>Reducciones anuales (Mcf/año/pozo)</b>
1	1,456	0	1,456
2	581	0	581
3	1,959	318	1,641
4	924	0	924
5	105	24	81
6	263	95	168
7	713	80	633
8	453	0	753
9	333	0	333
10	765	217	548
11	1,442	129	1,313
12	1,175	991	184
13	694	215	479
14	1,416	1,259	157
15	1,132	708	424
16	1,940	561	1,379
17	731	461	270
18	246	0	246
19	594	0	594
<b>Total</b>	<b>17,224</b>	<b>5,058</b>	<b>12,166</b>

### Consejos de instalación

Las sugerencias siguientes pueden ayudar a garantizar la instalación sin problemas de un sistema de bombeo neumático:

- ★ **No use un obturador de completación, porque éste limita la cantidad de producción de gas por viaje del émbolo.** Sin un obturador de completación, el espacio anual entero vacío está disponible para crear un gran suministro de gas comprimido. Mientras más grande el volumen de gas, más grande será el volumen de agua que puede bombearse.

## Lecciones aprendidas

- ★ **Verifique si existen obstrucciones de la tubería con un anillo calibrador antes de la instalación.** Las obstrucciones de la tubería dificultan el movimiento del émbolo y podría requerir el reemplazo de la tubería de producción.
- ★ **Capture el émbolo antes del primer viaje.** La inspección del émbolo para comprobar que no haya daños, arena ni escamas ayudará a evitar cualquier dificultad posterior operativa del bombeo, lo que permitirá la reparación inmediata operativa mientras que la cuadrilla y el equipo de instalación se moviliza.

Los sistemas de bombeo neumático ofrecen varias ventajas sobre los otros tratamientos de remedio para eliminar líquidos de depósito de los pozos: el aumento de las ventas de gas, aumento de la vida del pozo, la reducción del mantenimiento del pozo y la disminución de las emisiones de metano. Lo siguiente debe considerarse cuando se instale un sistema de bombeo neumático:

- ★ Las instalaciones de bombeo neumático pueden ofrecer la recuperación rápida de la inversión y un rendimiento más alto en las inversiones ya sea que reemplace el bombeo de balancín o purgados.
- ★ Las instalaciones de bombeo neumático puede reducir grandemente la cantidad de trabajo de remedio que se necesita a lo largo de la vida del pozo y la cantidad de metano que se ventila a la atmósfera.
- ★ El análisis de aspectos económicos de la instalación de bombeo neumático debe incluir el refuerzo en aumento de productividad así como la extensión relacionada con la vida del pozo.
- ★ Incluso cuando la presión del pozo disminuye más de lo que es necesario para levantar el émbolo y los líquidos contra la contrapresión de la línea de ventas, un émbolo es más eficiente para eliminar líquidos con el pozo ventilado a la atmósfera que simplemente purgando el pozo sin el bombeo neumático.
- ★ Incluya las reducciones de emisiones de metano con la instalación de los sistemas de bombeo neumático en los informes anuales presentados como parte del Programa Natural Gas STAR.

Nota: La información de costo provista en este documento se basa en cálculos para Estados Unidos. Los costos de equipo, mano de obra y el valor del gas variarán dependiendo del lugar, y podrían ser mayores o menores que en los Estados Unidos. La información sobre costo presentada en este documento solamente debe usarse como guía al determinar si las tecnologías y las prácticas son convenientes económicamente para sus operaciones.

---

## Referencias

Abercrombie, B. "Plunger Lift" in *The Technology of Artificial Lift Methods*, Vol. 2b, by K.E. Brown. PennWell Publishing Co., 1980 (pp. 483-518).

Beauregard, E., and P.L. Ferguson. *Introduction to Plunger Lift: Applications, Advantages and Limitations*. SPE Paper 21290 presentado en the Rocky Mountain Regional Meeting of the Society of Petroleum Engineers, Billings, MT, mayo de 1982.

Beeson, C.M., D.G. Knox, and J.H. Stoddard. *Plunger Lift Correlation Equations and Nomographs*. Paper 501-G presentado en AIME Petroleum Branch Meeting, New Orleans, LA, octubre de 1995.

Bracy, C.L., and S.J. Morrow. *An Economic Assessment of Artificial Lift in Low Pressure, Tight Gas Sands in Ochiltree County, Texas*. SPE Paper 27932 presentado en the SPE Mid-Continent Gas Symposium, Amarillo, TX, mayo de 1994.

Christian, J., Lea, J.F., and Bishop, B. *Plunger Lift Comes of Age*. World Oil, noviembre de 1995.

EVI Weatherford, contacto personal.

Ferguson, Paul L., and Beauregard, E. Will Plunger Lift Work in My Well. Southwestern Petroleum Short Course, (pp. 301-310), 1988.

Fishback II, J. William, Exxon-Mobil, contacto personal.

Foss, D.L., and R.B. Gaul. *Plunger-Lift Performance Criteria with Operating Experience—Ventura Avenue Field*. Drilling and Production Practice. American Petroleum Institute, 1965 (pp. 124-140).

Gregg, David, Multi Products Company, contacto personal.

GRI—EPA, Research and Development, *Methane Emissions from the Natural Gas Industry, Volume 2: Technical Report*. Preparado para the Energy Information Administration, GRI 94/0257.1, junio de 1996.

GRI—EPA, Research and Development, *Methane Emissions from the Natural Gas Industry, Volume 7: Blow and Purge Activities*. Preparado para the Energy Information Administration, GRI 94/0257.24, junio de 1996.

Lea, J.F. *Dynamic Analysis of Plunger Lift Operations*. SPE Paper 10253 presentado en the 56th Annual Fall Technical Conference and Exhibition, San Antonio, TX, octubre de 1981.

McAllister, E.W. *Pipe Line Rules of Thumb Handbook*, Cuarta edición. Gulf Publishing Company, 1998 (pp. 282-284).

O'Connell T., P. Sinner, and W.R. Guice. *Flexible Plungers Resolve CT, Slim Hole Problems*. American Oil and Gas Reporter, Vol. 40 No. 1 (pp 82-85).

Paugh, Len, Lomak Petroleum, contacto personal.

Phillips, Dan and Listik, Scott. *How to Optimize Production from Plunger Lift Systems*. *World Oil*, mayo de 1998.

Plunger Lift Systems, Inc., contacto personal.

Schneider, T., S., and Mackey, V. *Plunger Lift Benefits Bottom Line for a Southeast New Mexico Operator*. SPE Paper 59705 presentado en la Conferencia Permian Basin Oil and Gas Recovery, Midland, TX , marzo de 2000.

Smith, Reid, BP, contacto personal.

Tingley, Kevin, U.S. EPA Natural Gas STAR Program, contacto personal.

Walls, Brad, Resource Production Company, contacto personal.

Well Master Corporation, contacto personal.

Wellco Service Corporation, contacto personal.

---

## Apéndice

### Cálculo del aumento de producción en los pozos en decadencia.

Del artículo *Dake's Fundamentals of Reservoir Engineering* (1982) podemos usar la siguiente ecuación para calcular el aumento del flujo del agujero del pozo para la reducción de presión que puede verse cuando se usa el bombeo neumático. Una ecuación de estado semiestable puede expresarse de esta manera:

$$m(p_{\text{promedio}}) - m(p_{\text{wf}}) = \left[ \frac{1422 \times Q \times T}{k \times h} \right] \times \left[ \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - 3/4 + S \right] \times (8.15)$$

En donde,

$m(p_{\text{avg}})$  = promedio de seudopresión de gas real

$m(p_{\text{wf}})$  = flujo del pozo de seudopresión de gas real

Q = tasa de producción de gas

T = temperatura absoluta

k = permeabilidad

h = altura de la formación

$r_e$  = radio externo del límite

$r_w$  = radio del agujero del pozo

S = factor de revestimiento mecánico

Después de reunirse los parámetros del depósito, esta ecuación puede resolverse para la Q para el flujo retrasado de líquidos en el agujero (curva de las condiciones actuales y la disminución actual). Esto es una directriz, y se recuerda a los operadores que deben usar a un ingeniero de depósitos para que ayuden con esta determinación.

### Técnica alternativa para calcular las emisiones que se evitan cuando se reemplazan los purgados.

Puede realizarse un cálculo conservador de los volúmenes de ventilación de un pozo usando la ecuación siguiente:

$$\text{Volumen de ventilación anual, Mscf/año} = (0.37 \times 10^{-6}) \times (\text{diámetro del ademe})^2 \times \text{Profundidad del pozo} \times \text{presión de cierre} \times \text{ventilaciones anuales}$$

En donde el diámetro del ademe está en pulgadas, la profundidad del pozo está en pies y la presión de cierre está en psig. El Cuadro A1 muestra un cálculo de ejemplo.

<b>Cuadro A1: Ejemplo: Cálculo de las emisiones que se evitan con el purgado</b>	
Diámetro del ademe	8 pulgadas
Profundidad del pozo	10,000 pies
Presión de cierre	214.7 psig
Ventilaciones anuales	52 (ventilaciones semanales)
Volumen anual de ventilación = $(0.37 \times 10^{-6}) \times 8^2 \times 10,000 \times 214.7 \times 52 = 2,644$ Mscf/año	

Éste es el volumen mínimo de gas que se ventilaría a presión atmosférica de un pozo que ha dejado de fluir a la línea de ventas debido a que se ha acumulado una cabeza del líquido en la tubería que es igual a la diferencia de presión entre la presión de la línea de ventas y la presión de cierre. Si la presión de cierre es más de 1.5 veces la presión de la línea de ventas, según se requiere en la instalación de bombeo neumático en el Cuadro 2, entonces el volumen de gas en el ademe del pozo a presión de cierre debe ser suficientemente mínima para empujar el líquido a la superficie en flujo lento cuando la contrapresión se reduce a cero psig. Los participantes pueden calcular el tiempo mínimo de ventilación del pozo usando este volumen y la fórmula de flujo de gas de Weymouth (hecha para diámetros, longitudes y bajas de presión comunes de tubos en las Tablas 3, 4 y 5 en el Manual de Reglas Generales de Tubería (Pipeline Rules of Thumb Handbook), cuarta edición, páginas 283 y 284). Si la práctica y experiencia del participante es ventilar los pozos por más tiempo que el calculado mediante estos métodos, puede aumentarse el Volumen de Ventilación Anual conservativo con una simple proporción de veces reales de ventilación y el tiempo de ventilación mínima calculado usando la ecuación de Weymouth.



Agencia de Protección del Medio  
Ambiente de los Estados Unidos  
Aire y Radiación (6202J)  
1200 Pennsylvania Ave., NW  
Washington, DC 20460

EPA430-B-03-005S  
Octubre de 2003